

煤矸石利用过程中相关渗流力学问题研究

宋光远¹, 惠冰², 崔言继¹, 冉德钦², 宋海民¹, 樊祥喜³, 孟凌霄³

¹中建八局第一建设有限公司, 山东 济南

²山东省交通科学研究院, 山东 济南

³中建山东投资有限公司, 山东 济南

Email: 21430275@qq.com

收稿日期: 2020年9月8日; 录用日期: 2020年9月22日; 发布日期: 2020年9月29日

摘要

我国的煤矸石排放量很大, 长期堆存占用土地, 污染环境。煤矸石属于多孔介质结构体, 在其综合利用过程中会涉及到一系列渗流力学问题。本文综述和探讨了煤矸石利用过程中相关渗流力学问题研究, 总结了其研究现状及取得的进展, 以期加深对煤矸石利用过程中相关渗流力学问题的深层次认识。

关键词

煤矸石, 综合利用, 渗流力学

Study on Related Seepage Mechanics Problems in the Process of Coal Gangue Utilization

Guangyuan Song¹, Bing Hui², Yanji Cui¹, Deqin Ran², Haimin Song¹, Xiangxi Fan³, Lingxiao Meng³

¹China Construction Eighth Bureau First Construction Co. Ltd., Jinan Shandong

²Shandong Transportation Research Institute, Jinan Shandong

³China State Construction Shandong Investment Corporation, Jinan Shandong

Email: 21430275@qq.com

Received: Sep. 8th, 2020; accepted: Sep. 22nd, 2020; published: Sep. 29th, 2020

Abstract

China's coal gangue emissions are very large; long-term storage occupies land and pollutes the en-

文章引用: 宋光远, 惠冰, 崔言继, 冉德钦, 宋海民, 樊祥喜, 孟凌霄. 煤矸石利用过程中相关渗流力学问题研究[J]. 渗流力学进展, 2020, 10(1): 1-6. DOI: 10.12677/apf.2020.101001

vironment. Coal gangue belongs to porous media structure, and a series of seepage mechanics problems will be involved in its comprehensive utilization. This paper summarizes and discusses the related seepage mechanics problems in the process of coal gangue utilization, and summarizes its research status and progress, in order to deepen the understanding of the related seepage mechanics problems in the process of coal gangue utilization.

Keywords

Gangue, Comprehensive Utilization, Seepage Mechanics

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

我国煤炭储量非常丰富,采洗煤过程中排放的煤矸石数量庞大且在逐年增长。目前我国煤矸石的利用率较低,多数煤矸石产出后未经处理就倾倒入堆在矿区周围,形成了大量的煤矸石山,侵占土地并带来了严重的环境污染[1]。废物资源化,环保可持续已成为一种趋势,将会有力地推动技术创新和科技进步,推动生产力的发展,促进生态文明。因此,如何解决煤矸石的有效综合利用是一个重要课题。煤矸石可以作为充填材料、注浆材料,在煤矿开采破碎岩体研究中也会涉及到。煤矸石是一种特殊的多孔介质结构[2],在研究过程中会涉及到一系列渗流力学问题,因此深入研究煤矸石综合利用过程中相关渗流力学问题具有十分重要的理论意义和实际价值。

2. 煤矸石作为充填材料中的渗流力学研究

随着技术的进步,充填开采技术也日臻完善,充填方式也日趋多样化[3]。按充填方式可将充填开采分为水力充填、风力充填、机械充填、矸石自溜充填等。目前矿山应用的充填开采方法与技术主要为固体废弃物充填开采及胶结材料充填开采。固体废弃物主要是指煤矸石。在煤炭开采过程中,产生的固体废弃物矸石在百分之十五至百分之二十五,我国历年累计堆放的煤矸石约四十五亿吨,而且堆积量还以每年一两亿吨的速度增加。在美国,年产矸石量也在一点五亿吨,废弃的入选煤量的百分之三十作为矸石直接排放于矸石山。相关科研工作者通常认为,煤矿排矸带来的环境和资源问题,可以通过采用煤矸石作为充填材料充填在井下解决[4][5][6][7]。在环境与能源问题日益突出的今天,煤炭开采日趋环保化,煤炭绿色开采理念正是在此基础上提出来的。煤矿常规开采方法引起地表沉陷严重煤矿开采产生的矸石量大,占地污染严重正在自燃的矸石山,如遇到雨水的渗入,受热后空气急剧膨胀,会引起爆炸,造成更大的危害,必须对煤矸石进行综合治理把煤矸石、灰渣等废弃物充填到井下,进行充填开采,是解决煤矿常规开采方法引起的地表沉陷,处理和利用煤炭开采产生的各种废弃物行之有效的方法。王戈[8]针对充填开采条件下采空区瓦斯运移问题,在查阅国内外大量综采工作面充填开采技术研究文献和采空区瓦斯涌出及运移分布研究文献的基础上,借助岩石力学、流体力学、瓦斯渗流理论、多孔介质渗流理论及相关理论,运用理论分析、物理数学建模分析、计算机仿真技术等手段,研究型和型两种矿井通风系统下充填煤矸石、灰渣和泥沙三种充填物对采空区瓦斯运移的影响,发现煤矸石粒径大,抗压强度大,受压后空隙率变化小,充填煤矸石有利于减少采空区中深部的瓦斯积聚,而充填灰渣和泥沙时效果不如煤矸石。煤矸石抗压强度大,受压情况下体积变化小,所以充填煤矸石时采空区各部分空隙率差别很小。

随着相当一部分矿区的煤炭资源逐渐枯竭,煤矿开采开始向深部延伸,这些矿区可开采的资源大都为“三下”压煤,压煤的开采方法现多数矿井采用充填开采而煤矿的研石山及煤研石发电厂的灰渣堆积在地面也会造成环境污染,所以一些矿区如贵州六盘水盘江矿区考虑将研石山及煤研石发电厂产生的灰渣充填到井下以解决压煤和研石、灰渣的地面堆积问题。但是该研究在理论分析上只考虑了型和型两种通风系统下的瓦斯运移规律,未考虑更多的通风系统;在选取充填物方面也存在着同样的问题充填物选取不够丰富;同样会影响本文结论的代表性;未考虑型通风系统下充填采空区的瓦斯抽放问题,对高瓦斯矿常用到得高位巷抽放也未考虑;该研究并未进行现场实验,未能将理论方面同实践结合到一起。

关于承压散体渗流研究,黄先伍、李顺才和黄伟[9] [10] [11]利用轴向位移控制的方法测试了不同粒径破碎煤研石在不同孔隙度下的渗透特性,并给出了其渗透特性随孔隙度变化的曲线。黄伟的研究对岩体包括煤层及其上覆若干岩层变形、瓦斯运移、充填物及支架的耦合作用做了初步研究,取得了一些成果,但是耦合作用的复杂性尚需进一步研究,比如覆岩垮落后的计算、响应计算方法的通用性和支架与围岩的耦合作用等。王志飞等[12]用煤研石标准试样和破碎研石研究了研石的非 Darcy 渗流特性,得出标准试样的煤研石为非 Darcy 渗流,渗透率量级为 $10^{17}\sim 10^{18} \text{ m}^2$ 。刘玉[13]通过轴向位移控制法及稳态渗透法测试了煤研石在不同孔隙率下的非 Darcy 渗透试验结果,认为孔隙率是使渗透率降低和非达西因子绝对值增加的主要原因,但破碎颗粒排列的不规则性和结构的调整使得 $k-\phi$ 、 $\beta-\phi$ 曲线出现局部波折。

关于煤研石与黄土混合的渗流特性,贺建清等[14] [15]为分析煤研石中掺土作为高速公路路堤填料的可行性,通过掺土煤研石的动三轴试验,对掺土煤研石在循环荷载作用下的动力特性进行试验研究,得到在煤研石中掺入适当比例的黏土,其强度均有不同程度的提高,其中以煤研石与土的干质量为 3:1~4:1 时效果较为明显。鲍远琴[16]采用掺土比分别为 0%、5%、10%和 15%的 4 组不同的煤研石试样,研究掺土煤研石混合料在不同压实度下的抗剪强度参数(凝聚力、摩擦角)、饱水 96 h 下抗剪强度参数和掺土量三者之间的关系。研究表明掺入土后试样的孔隙结构随着试样粘性成分的增加而增加,进而使得煤研石的凝聚力有所增加;而掺土到一定量之后,粘性成分的增加会改变煤研石原有性质,又使得煤研石的凝聚力下降,最终得到掺入 10%左右粘土可最大限度的增加煤研石的粘性成分,凝聚力也是最好,对煤研石稳定性的改善也最明显。因此本实验做不同粒径与黄土混合的比例选取为 1:0.3,做黄土掺量的影响时,配比选取为 1:0.1、1:0.3、1:0.5。

3. 煤研石作为注浆材料中的渗流力学研究

王慧涛[17]基于过火煤研石可有效提高胶凝活性的特点,研发以过火煤研石为主、少量水泥及粘土为辅的新型注浆加固材料;得出随着过火煤研石含量的增加,新型材料流动性大于普通硅酸盐水泥,浆液具有优异的长距离泵送性及操作性能;新型材料的胶凝时间可通过调节速凝剂、早强剂等外加剂含量而实现相应调整,可保证浆液具有良好的扩散性能;与传统材料相比,当水泥含量一定时,新型材料的中后期强度存在较为明显的提升;新型材料体系中的过火煤研石可有效提高结石体的致密度和抗渗性,削弱大含量粘土导致结石体抗渗性较差的缺陷。采用有限元计算软件中的固体力学模块及渗流力学模块开展计算工作,通过固体力学模块计算注浆加固改造对煤层采空区稳定性的影响,通过渗流力学模块计算注浆改造对煤层采空区涌水量的影响。基于此,最终提出新型奥灰含水层注浆材料工业试生产技术和工艺实施方案,验证新型材料的工程适用性,取得了一系列具有实用价值的研究成果。虽然该研究提出了一套较为完整的适用于煤矿底板的注浆加固方法,并且在白庄煤矿底板治理中获得了良好的治理效果,但到目前为止仍没有得到其它方面的工程验证,因此仍应该在工程实践中继续充实和提高。

谷天峰等[18]通过室内试验,研究了用于采空区注浆的水泥-煤研石材料的主要性能。探讨了使用大

掺量煤矸石情况下,水固比、水泥掺量、外掺剂与结石体强度、凝结时间、粘度、析水率、结石率之间的关系。结果表明使用经低温活化、机械粉碎的煤矸石粉配制的浆液较未经过活化处理的浆液的结石体强度明显提高,可用于采空区注浆工程。水玻璃可以对水泥煤矸石浆液体系产生作用,影响浆液的粘度、初凝时间、终凝时间等。可利用水玻璃对浆液性能进行调整,以适应不同注浆环境的要求。该浆液原材料来源广泛,可以解决注浆用粉煤灰缺乏及煤矸石资源利用问题。

4. 煤矸石在破碎岩体研究中的渗流力学研究

姜振泉等[19]利用自制容器探讨了煤矸石压密性与颗粒破碎关系,试验结果显示较大比例的软岩矸石出现破碎,并伴随有密实程度和颗粒级配的明显变化。煤矸石在压密过程是矸石经过破碎→压密→再破碎→再压密的渐进压密过程。刘松玉等[20] [21]运用对煤矸石开展三轴压缩渗透试验,其研究表明:煤矸石渗透及强度、变形特性受控于其粒度级配特征及颗粒破碎变化规律,不同粗细料比例煤矸石强度包线均近似直线,强度公式可采用库仑公式,且应力应变关系曲线可用双曲线进行拟合。Zhou, Zhang等[22] [23]对不同颗粒粒径破碎煤矸石在不同应力下压实分形及能量耗散特征进行了研究,结果表明随着应力的增大,各试样的粒度分布趋于分散,分形维数随着小颗粒含量的增加而增大,并最终趋于一定的值。在相同的初始颗粒级配和应力下,分形维数随岩石强度的增加而减小。压实过程中能量耗散与变形的三个阶段相对应具有明显的阶段性,且颗粒尺寸和加载速率对煤矸石的变形和能量耗散有显著影响。李顺才等[10]利用稳态渗透法及轴向位移控制法测定了粒径分别为 5 mm~10 mm、10 mm~15 mm、15 mm~20 mm、20 mm~25 mm 以及混合粒径的破碎砂岩、煤矸石及灰岩在承压过程中非 Darcy 流的渗透特性,发现随着孔隙率的减少,渗透率呈现整体下降的趋势,三种破碎岩石渗透率的量级为 $10\sim 16\text{ m}^2\sim 10\sim 12\text{ m}^2$ 。李顺才[24]还利用轴向位移控制法,研究了不同粒径的煤矸石非 Darcy 渗透特性随孔隙率的变化规律,研究表明,随着孔隙率的减少,渗透率的量级减少,而 Darcy 流偏离因子的绝对值量级增加。

李振[25]详细研究了破碎煤矸石压实过程中声发射参数演化,破碎煤矸石声发射计数参数随时间演化规律与其压缩变形的三个阶段有着很好的对应性,声发射计数随时间演化规律可以用来表征破碎煤矸石侧限约束下轴向压缩的不同阶段。在初始压密阶段,破碎颗粒之间处于相对松散状态,在轴向压力压缩作用下,破碎颗粒与颗粒之间表现为接触状态的调整和颗粒间空隙的快速闭合。随着轴向应力增加,破碎颗粒继续旋转移动、块体间空隙继续填充、闭合,在此期间破碎煤岩体由于棱角的逐步相互咬合而形成比较密实的骨架。该过程同时伴随有少量不规则颗粒的破碎,因此整个初始压密阶段会出现由旋转、摩擦和颗粒间位错引起的摩擦型声发射信号以及由极少量不规则颗粒棱角破碎引起的破碎型声发射信号,但整体而言四种粒径下破碎煤矸石在该阶段内声发射计数相对很少。在线性压实阶段,破碎颗粒体经前期的初始压密阶段后形成了具有较密实骨架结构的颗粒组合体,抗变形能力亦随应力增大而逐渐增强。该阶段压力机输入的功将转化为不可逆的颗粒块体间摩擦耗能和颗粒破碎耗能,同时伴有破碎颗粒的弹性变形能。与初始压密阶段相对比,随着应力的增加,颗粒间由于破碎引起的声发射计数以及由于骨架更加密实而导致的摩擦型声发射计数均逐渐增大。该阶段变形范围内颗粒块体与块体间接触一旦超过颗粒破碎所需破碎耗能,则破碎颗粒体发生破坏形成更小的破碎颗粒体并再次填充剩余空隙,使整个破碎颗粒体骨架结构更加密实。在塑性压固阶段,四种粒径破碎煤矸石声发射计数表现出随加载持续进行进行逐渐减小的趋势,同时声发射累积计数曲线由线性压密阶段后期的线性增长趋势演变为上凸衰减式增长趋势。出现该现象的原因可能是,经过前期线性压密阶段应力的作用,破碎煤矸石颗粒组合体已经形成了抗变形能力更强的“应变硬化型”骨架结构,该阶段压力机做的功转化为颗粒破碎耗能和摩擦耗能的总量随着轴向位移的持续增加有所降低,因此整个声发射累积计数曲线呈现衰减式增长趋势。该研究揭示了不同类型老空区煤层气储气空间三维发育特性,并联合破碎煤岩体变形渗流特性提出了地面钻井

井位优选方法, 然而针对包含孔隙、裂隙及空隙三重孔隙结构的复杂老空区煤层气储气空间还需要进一步开发相应的渗流数值模拟模型对钻井抽采参数进行优化。

5. 结论

把煤矸石作为一种资源加以开发利用, 能变废为宝, 物尽其用。本文对煤矸石利用过程中相关渗流力学问题的研究进展进行了综述, 对煤矸石利用过程中相关渗流力学问题的深层次认识具有一定的理论价值和实际意义。相关渗流特性的影响规律和作用机理研究是未来研究的一个方向。

基金项目

山东省交通运输厅科技计划(2019B24), 中建股份科技研发计划(CSCEC-2020-Z-52), 山东省地方路网交通建设标准化示范、智能提升示范建设项目(C1940)。

参考文献

- [1] 廖程浩, 刘雪华, 张永富. 煤矸石山修复的碳减排效益——以阳泉矿区为例[J]. 环境科学与技术, 2010(3): 201-205.
- [2] 张雁, 张宇, 郭利勇, 等. 非饱和压实膨胀土掺煤矸石的特性研究[J]. 环境工程学报, 2016(9): 5115-5120.
- [3] 钱鸣高, 缪协兴, 许家林, 等. 岩层控制的关键层理论[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003.
- [4] 缪协兴, 张吉雄. 矸石充填采煤中的矿压显现规律分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2007(4): 5-8.
- [5] 邹永滔, 方新秋, 刘士辉. 赵庄矿边角煤矸石充填开采技术研究[J]. 煤, 2012, 21(1): 5-8, 34.
- [6] 陈忠平. 泡沫砂浆充填体力学特性及其应用研究[J]. 金属矿山, 2010, 39(8): 7-10.
- [7] 缪协兴, 张吉雄, 郭广礼. 综合机械化固体充填采煤方法与技术研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(1): 1-6.
- [8] 王戈. 综采工作面充填开采采空区瓦斯运移研究[D]: [硕士学位论文]. 湘潭: 湖南科技大学, 2009.
- [9] 黄先伍, 唐平, 缪协兴, 等. 破碎砂岩渗透特性与孔隙率关系的试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 25(9): 1385-1388.
- [10] 李顺才, 缪协兴, 陈占清, 等. 承压破碎岩石非 Darcy 渗流的渗透特性试验研究[J]. 工程力学, 2008, 25(4): 85-92.
- [11] 黄伟. 基于流固耦合动力学的矿压显现与瓦斯涌出相关性分析[D]: [博士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2011.
- [12] 王志飞, 陈占清, 孔海陵. 煤矸石非 Darcy 渗流的渗透特性试验研究[J]. 煤炭技术, 2016, 35(1): 292-294.
- [13] 马占国, 缪协兴, 陈占清, 等. 破碎煤体渗透特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(4): 985-988.
- [14] 贺建清, 阳军生, 靳明. 循环荷载作用下掺土煤矸石力学性状试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008(1): 204-210.
- [15] 贺建清, 靳明, 阳军生. 掺土煤矸石的路用工程力学特性及其填筑技术研究[J]. 土木工程学报, 2008, 41(5): 87-93.
- [16] 鲍远琴, 王锐, 王雨伟. 掺土煤矸石的力学性能试验研究[J]. 兰州工业学院学报, 2013(4): 34-37.
- [17] 王慧涛. 煤矿底板突水机制与新型注浆材料加固机理及工程应用研究[D]: [博士学位论文]. 济南: 山东大学, 2020.
- [18] 谷天峰, 孙忠弟, 骆凤涛, 等. 水泥-煤矸石采空区注浆材料的试验研究[EB/OL]. 北京: 中国科技论文在线. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201312-889>, 2013-12-26.
- [19] 姜振泉, 季梁军. 煤矸石的破碎压密作用机制研究[J]. 中国矿业大学学报, 2001, 30(2): 139-142.
- [20] 刘松玉, 邱钰, 童立元, 等. 煤矸石的强度特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(1): 199-199.
- [21] 刘松玉, 童立元, 邱钰, 等. 煤矸石颗粒破碎及其对工程力学特性影响研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(5): 505-510.
- [22] Zhou, N., Han, X., Zhang, J., et al. (2016) Compressive Deformation and Energy Dissipation of Crushed Coal Gangue. *Powder Technology*, **297**, 220-228. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.04.026>
- [23] Zhang, J., Li, M., Liu, Z., et al. (2017) Fractal Characteristics of Crushed Particles of Coal Gangue under Compaction. *Powder Technology*, **305**, 12-18. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.09.049>

- [24] 李顺才. 破碎岩体非 Darcy 渗流的非线性动力学研究[D]: [博士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2006.
- [25] 李振. 老空区破碎煤岩体变形与渗流特性研究及在煤层气抽采中的应用[D]: [博士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2018.